

引用格式: 刘圣鑫, 付汇琪, 冯兴强, 等, 2024. 致密砂岩裂缝网络复杂性及其影响因素研究 [J]. 地质力学学报, 30 (4): 563–578.

DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023128](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023128)

Citation: LIU S X, FU H Q, FENG X Q, et al., 2024. Fracture network complexity of tight sandstone and its influencing factors[J]. Journal of Geomechanics, 30 (4): 563–578. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023128](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023128)

致密砂岩裂缝网络复杂性及其影响因素研究

刘圣鑫^{1,2}, 付汇琪³, 冯兴强^{1,2}, 韩晓祥^{2,4}, 王炳乾⁴

LIU Shengxin^{1,2}, FU Huiqi³, FENG Xingqiang^{1,2}, HAN Xiaoxiang^{2,4}, WANG Bingqian⁴

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质调查局油气地质力学重点实验室, 北京 100081;

3. 吉林省地质矿产局二所, 吉林 吉林 132001;

4. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Key Laboratory of Petroleum Geomechanics, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*

3. *The Second Survey of Jilin Geological mineral, Jilin 132001, Jilin, China;*

4. *School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China*

Fracture network complexity of tight sandstone and its influencing factors

Abstract: [Objective] Fracture network analysis plays an important role in oil and gas exploration and development. However, complexity analysis of tight sandstone fracture networks and their control factors is relatively lagging. Based on an experimental study of the dynamic evolution of the complex fracture network in tight sandstone, the fractal and multifractal spectral characteristics of the fracture network were defined, and the complexity and main controlling factors of the fracture network were analyzed. Fracture network complexity analysis of tight sandstone plays an important role in hydraulic fracturing optimization, fracture network prediction, and fracture modeling. [Methods] Rock mechanics and X-ray computed tomography scan experiments determined the characteristics of rock mechanics and fracture networks. The microstructure and fracture network fractal characteristics of tight sandstone were quantitatively characterized by SEM and fracture network fractal analysis. [Results] The results showed that the quartz content of tight sandstone ranges from 28.08 to 52.88%, clay content ranges from 11.54 to 25.45%, particle size ranges from 61.18 to 184.55 μm , and porosity ranges from 8.125 to 10.296%. Uniaxial compressive strength ranges from 69.09 to 188.33 MPa, and the elastic modulus ranges from 31.69 to 92.76 GPa. The fractal dimension (D_B) ranges from 1.28 to 2.35 and average spectral width ($\Delta\alpha$) ranges from 1.0851 to 1.3638. [Conclusion] The initiation and propagation of fractures extend through the entire stress-strain process. The complexity of the fracture network of tight sandstone is mainly controlled by microscopic fabric characteristics, and has obvious confining pressure as well as scale effects. The D_B of the three-dimensional fracture network and average $\Delta\alpha$ of the multifractal spectrum represents the complexity and heterogeneity of the fracture spatial distribution, respectively, and are relatively independent. As the content of quartz, feldspar, and other brittle minerals in sandstone increases, the porosity of the reservoir increases, particle size of the sandstone decreases, D_B of the fracture network increases, and average $\Delta\alpha$ decreases. In the absence of confining pressure, the complexity of the sample fracture network is mainly controlled by the microscopic fabric characteristics, and the complexity increases with increase of axial pressure. When present confining

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20243449); 国家自然科学基金项目 (42277167)

This research is financially supported by the Geological Survey Projects of the China Geological Survey (Grant No. DD20221660) and National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42277167).

第一作者: 刘圣鑫 (1978—), 男, 助理研究员, 主要从事岩石力学研究。Email: 807228351@qq.com

通讯作者: 付汇琪 (1983—), 女, 高级工程师, 主要从事大地构造研究。Email: 253458813@qq.com

收稿日期: 2023-08-03; 修回日期: 2023-12-18; 录用日期: 2024-01-04; 网络出版日期: 2024-01-04; 责任编辑: 吴芳

pressure plays a leading role; the higher it is, the lower the D_B value, and the higher the mean $\Delta\alpha$ value. Clay minerals are un conducive to complex fractures formation. The mean values of D_B and $\Delta\alpha$ of small-scale samples are greater than those of large-scale samples. The elastic modulus and compressive strength of sandstone are positively correlated with D_B and mean $\Delta\alpha$.

Keywords: tight sandstone; fracture network; fractal dimension; multifractal spectrum; rock mechanics

摘要: 裂缝网络分析在油气藏勘探开发过程中发挥着重要作用, 致密砂岩裂缝网络复杂性分析对水力压裂优化、裂缝网络预测、裂缝建模等具有重要意义。文章结合致密砂岩复杂的裂缝网络动态演化的实验研究, 明确了裂缝网络的分形和多重分形谱特征, 深入分析了裂缝网络的复杂性及其主控因素。通过岩石力学和X射线CT扫描实验确定了岩石力学和裂缝网络特征; 通过扫描电镜实验、裂缝网络的分形分析定量化表征了致密砂岩微观组构和裂缝网络的分形特征。研究结果表明: 致密砂岩的石英含量为28.08~52.88%, 黏土含量为11.54~25.45%, 粒度为61.18~184.55 μm , 孔隙度为8.125%~10.296%; 单轴抗压强度介于69.09~188.33 MPa, 弹性模量介于31.69~92.76 GPa; 分形维数(D_B)为1.28~2.35, 谱宽($\Delta\alpha$)平均值为1.0851~1.3638。裂缝的萌生、扩展贯穿于应力-应变的全过程, 裂缝网络的复杂性主要受控于致密砂岩的微观组构特征, 并且具有明显的围压和尺度效应。三维裂缝网络的分形维数、多重分形谱的谱宽平均值可分别表征裂缝空间分布的复杂性和非均质性, 两者之间具有相对的独立性。砂岩中石英、长石等脆性矿物含量越高、储层孔隙度越大、砂岩组成粒度越小裂缝网络分形维数越大, 谱宽平均值越小; 无围压情况下, 样品裂缝网络的复杂性主要受控于微观组构特征, 且随着轴向压力的增加而增加; 存在围压的情况下, 围压起主导作用, 围压越大分形维数越小, 谱宽平均值越大。而黏土矿物不利于复杂裂缝的形成; 小尺度样品的分形维数和谱宽平均值大于尺度大样品的分形维数和谱宽平均值。砂岩的弹性模量和抗压强度与分形维数和谱宽平均值具有一定的正相关性。

关键词: 致密砂岩; 裂缝网络; 分形维数; 多重分形谱; 岩石力学

中图分类号: TD315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2024) 04-0563-16

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023128

0 引言

基于致密储层的低孔、低渗特点, 通常采用水平井和水力压裂技术相结合的方法进行储层改造, 使储层的水力裂缝沟通天然裂缝形成复杂的裂缝网络, 进而提高油气井产量(Duncan and Eisner, 2010; Li et al., 2018; 樊建明等, 2019; 刘敬寿等, 2019; 缪思钰等, 2019; 尚春江等, 2019; 王瑜等, 2021; 文贤利等, 2021; 邢慧通等, 2022)。在致密砂岩储层中, 由于岩石致密、脆性大, 在构造应力作用下一般发育天然裂缝(Zeng et al., 2016; Hou et al., 2018; 谭元隆等, 2021; Zhu et al., 2022a; 文山师等, 2023; 杨帆等, 2023)。定量化分析天然裂缝网络的演化特征、复杂性及其控制因素, 可以获得裂缝空间分布规律及其表征的关键参数(陈鑫等, 2022; 武男等, 2022; 张德明等, 2023), 这对致密储层的裂缝预测以及水力压裂优化等具有重要的理论指导意义。

研究岩石中裂缝的网络演化过程, 既可以获得岩石在不同变形阶段裂缝网络差异性变化特征, 又

可以分析裂缝形成的微观机理和控制因素(Griffith, 1924; 谢和平和陈至达, 1989; 凌建明, 1993; Nasseri et al., 1997; 钟建华等, 2015)。传统力学实验, 如三轴力学实验、声发射实验, 为研究岩石的裂缝演化提供了一种相对简单的方法。然而, 传统方法很难深入研究岩石的微观破坏机理和定量化分析裂缝网络(Pestman and Van Munster, 1996; Cai et al., 2007; 刘飞跃等, 2018; 潘丽燕等, 2023)。随着研究的深入, 测量技术的不断进步, 新的实验方法不断被采用。例如: X射线计算机断层扫描(CT)成像技术, 作为一种无损探测方法, 在分析岩石的裂纹动态扩展方面具有独特的优势(Liu et al., 2018; Wu et al., 2020; Wang et al., 2021)。该技术通过实时X射线断层扫描, 可以获得裂缝网络演化过程中的实时3D数据; 通过数据分析, 提取岩石不同变形阶段的裂缝网络图像, 分析裂缝网络的扩展演化规律, 从而实现岩石裂缝空间分布特征的定量化研究(Liu et al., 2018; Duan et al., 2020; Wang et al., 2023)。

已有研究表明, 岩石裂缝网络的复杂性和空间

分布主要受控于自身的微观组构特征和外部载荷条件(赵程等, 2016; 熊良锋, 2021; Wang et al., 2023)。在相同的外部载荷条件下, 岩石类型不同, 裂缝网络的复杂性与空间分布等存在明显的差异。岩石破裂通常受到矿物粒径分布、矿物成分、胶结程度、微观孔隙结构等内部因素的影响(Jarvie et al., 2007; Ghasemi et al., 2020; Li et al., 2020; 于鑫等, 2021; 熊良锋等, 2022; Wang et al., 2023)。同时, 岩石破裂还存在明显的围压效应, 围压加强了岩石的承载能力和抗变形能力, 进而影响裂缝网络的复杂性。在低围压下, 岩石主要发生拉张性破裂, 微裂缝发育数量多; 高围压下抑制岩石微裂缝扩展, 以剪切破裂为主(Bieniawski, 1967; Cai et al., 2004; 李世恩等, 2010; 钟建华等, 2015; 刘圣鑫等, 2019; 高晨阳等, 2023)。

裂缝网络的复杂性主要体现在2个方面: 裂缝网络的空间充填能力与空间分布的非均质性。运用分形理论对于多孔介质中的复杂微结构进行了量化。随后众多学者通过各种测量获取岩石的裂缝网络图像特征, 并通过提取其二维裂缝网络图, 对其进行分形分析(Barton, 1995; Berkowitz and Hadad, 1997; Thiele et al., 2017)。Shi et al.(2018)和Wu et al.(2019)发现不同尺度的裂缝网络都具有分形特征, 通过分形维数可量化裂缝的空间复杂性。然而, 单一的分形维数并不能用于量化裂缝网络空间分布的非均质性。相关学者曾提出通过变异系数的空间变化来量化裂缝网络的非均质性(Dershowitz et al., 1992; Zhu et al., 2022a), 但变异系数对于分区网格的大小很敏感, 需要仔细选择分区的大小和理由来比较不同模式的异质性。另一种方法是计算裂缝网络的多重分形谱, 在多重分形理论中, 整体的裂缝网络被视为具有不同奇异度的局部裂缝网络的集合, 每个局部裂缝网络可以用特定的分形维数来表征。多重分形谱提供了关于整体裂缝网络的丰富信息, 奇异性变化可以反映目标集的非均质性(Mandelbrot et al., 1982; Berkowitz et al., 1997; Zhu et al., 2022c)。Zhu et al. (2022c)利用离散裂缝网络模型, 系统研究了复杂二维裂缝网络中裂缝性质对分形和多重分形特征的影响, 认为多重分形谱的谱宽可以评价裂缝网络的非均质性。

尽管相关学者在裂缝网络复杂性分析及其控制因素方面做了大量的研究, 但对于定量裂缝网络复杂性与控制因素的定量研究还较少。因此, 文章

融合多种实验手段, 通过对岩石裂缝网络图像的提取、分形维数和多重分形谱的计算, 拟定量分析裂缝网络的复杂性及其关键控制因素。

1 样品与实验分析

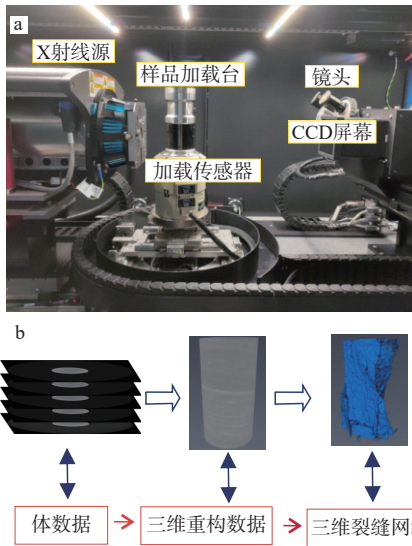
1.1 样品制备

实验样品采自秋林地区三叠系井下致密砂岩, 共7块。砂岩粒度较细, 具有明显的低孔、低渗特征。将样品分为2组(QXY、QDY)进行加工, 其中QXY组样品3块, 主要开展裂缝网络动态演化实验, 利用线切割机, 加工成 $\Phi 4\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 个小圆柱体, 每个样品取2个平行样, 1个做先期测试得到应力应变曲线, 目的是用于预估样品应力应变特征; QDY组样品4块, 主要开展常规三轴实验, 利用线切割机, 加工成 $\Phi 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 标准圆柱体。上面7块样品的剩余样加工成薄片, 对其进行精细抛光, 开展全自动矿物分析(AMICS)实验。

1.2 实验流程

1.2.1 基于CT扫描的裂缝网络动态演化实验与数据处理

裂缝网络动态演化实验在中国地质调查局油气地质力学重点实验室, 利用内置Zeiss Xradia 510Versa的高分辨率X射线显微镜(XRM/微米CT)完成(图1a)。该设备最大载荷能力为5 kN, 最大行程10 mm。实验设置与流程如下: ①在样品放入压缩室前进行CT扫描, 以揭示样品的初始内部结构信息; ②将砂岩样品放入单轴压缩室内, 再将单轴压缩室置于微米CT旋转台上, 单轴压缩的位移速率固定为0.01 mm/min, 在加载过程中, 每500 ms记录一次应力和轴向位移的完整信息; ③基于试样压缩过程中应力-应变曲线的微小变化和实时微米CT投影, 选取反映裂纹萌生、扩展和发展的特征点进行三维CT扫描。实验X射线源参数设置为电压80 kV、功率7 W、曝光时间9 s、空间分辨率14 μm 。CT扫描图像数据处理流程如图1b所示: ①三维重构, 将灰度X射线图像获得的信息作为原始数据, 利用蔡司Reconstructor软件对原始数据进行重构, 生成三维数据体; ②裂缝网络提取, 通过DRAGONFLY图像处理软件对三维数据体进行滤波、对比度调整、锐化和阈值(分水岭)分割等处理, 最终得到样品裂缝网络的三维模型, 并计算裂缝网络的体积和孔隙度等参数。



a—实验装置; b—处理流程

图1 微米CT内置压缩装置及数据处理过程

Fig. 1 Micron CT built-in compression device and data processing process diagram

(a) Experimental equipment; (b) Processing processes

1.2.2 全自动矿物分析

利用卡尔蔡司 Sigma 300 场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM) 和 AMICS 分析系统对样品的微观结构和矿物组成进行观察。实验工作条件: 电压 20 kV, 光阑 120 μm , 工作距离 8.5 mm。对 QXY 和 QDY 2 组样品做了全自动矿物分析, 并获得了样品的矿物组成、含量和粒度等参数。

1.2.3 三轴岩石力学实验

对 QDY 组 4 块样品做三轴岩石力学实验, 共设置 0 MPa、15 MPa、30 MPa 三级围压, 其中 2 块样品的围压设置为 0 MPa, 另外 2 块样品的围压分别为 15 MPa、30 MPa, 围压加载速率为 2 MPa/min; 变形加载速率为 0.05 mm/min。获得应力应变曲线、抗压强度、弹性模量、泊松比等力学参数。

1.3 分形维数与多重分形谱

1.3.1 分形维数

分形维数突破了传统欧式几何学对于维数的限制, 为自然界中复杂形状的结构描述提供了定量分析工具。文章采用分形维数来表征裂缝网络空间分布的复杂性, 应用盒子数法计算裂缝的分形维数。盒子计数法是将不同大小的盒子叠加在裂缝图上, 计算包含裂缝的盒子数量 (N_ε)。对于分形图, N_ε 和盒子边长 (ε) 满足如下关系:

$$N_\varepsilon = \varepsilon^{D_B} \quad (1)$$

其中 D_B 为分形维数。

1.3.2 多重分形谱

分形维数适用于表示样品裂缝整体的扩展情况和自相似规律, 描述事物在某一标度尺寸下的特征, 但无法反映局部特征。多重分形是从局部出发, 用一个谱函数来描述分形体不同层次的特征, 进而研究分形体最终的整体特征。

同样采用盒子数法计算裂缝多重分形谱。用正方形盒子去覆盖裂缝图形 (边长 ε), 统计每个盒子中含有裂缝的像素数目 (n_{ij}), $\sum n_{ij}$ 为图像中全部裂缝的像素数目, 可求得每个盒子中裂缝占总体裂缝的概率, 即裂缝分布概率 $p_{ij}(\varepsilon)$:

$$p_{ij}(\varepsilon) = \frac{n_{ij}}{\sum n_{ij}} \quad (2)$$

则裂缝分布概率 $p_{ij}(\varepsilon)$ 、具有同分布概率的盒子总数 $N_\alpha(\varepsilon)$ 均与 ε 有幂律函数关系:

$$p_{ij}(\varepsilon) \sim \varepsilon^\alpha \quad (3)$$

$$N_\alpha(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-f(\alpha)} \quad (4)$$

其中, α 为奇异值数, 反映各盒子内部的奇异程度; $f(\alpha)$ 为具有相同奇异性的子集的多重分形谱。

基于统计物理方法来实现不规则图像的多重分形谱计算, 定义配分函数 $\chi_q(\varepsilon)$ 为裂缝分布概率 $p_{ij}(\varepsilon)$ 的 q 次方的总和。 q 为每个盒子的权重因子, 则:

$$\chi_q(\varepsilon) = \sum_{i,j} p_{ij}(\varepsilon)^{\tau(q)} = \varepsilon^{\tau(q)} \quad (5)$$

q 在全谱范围内 $[-\infty, +\infty]$, 在实践中, q 的值是有限的, 步长为 1。当 q 大于 0 时, 代表增强概率密度高值的影响, 小于 0 时, 代表增强概率密度低值的影响; 等于 0 时, $\chi_q(\varepsilon)$ 退化为 N_ε , 多重分形谱的最大值即 $f_{\max}(\alpha)$ 等于 D_B 。 $\tau(q)$ 是一个质量指数, 可以通过 $\ln(\chi_q(\varepsilon))$ 和 $\ln(1/\varepsilon)$ 之间的线性回归得到。

$$\tau(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(\chi_q(\varepsilon))}{\ln(1/\varepsilon)} \quad (6)$$

对 $\tau(q)$ 进行勒让德变换, 得到多重分形谱 $f(\alpha)$:

$$\alpha(q) = (d\tau(q))/dq \quad (7)$$

$$f(\alpha) = q\alpha(q) - \tau(q) \quad (8)$$

从多重分形谱中可以得到的重要参数有 α 、 $f(\alpha)$ (图 2)。不同 α 值表示不同分形子集的奇异程度。 $f(\alpha)$ 为以 α 为特征的子集对应的多重分形谱。多重分形谱的宽度由 $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ 给出, 数值越大代表裂缝网络空间分布越不均匀, 即非均质性越强。

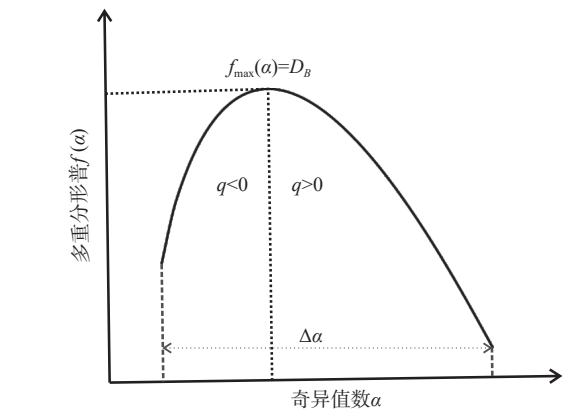


图 2 多重分形谱示意图
Fig. 2 Schematic diagram of multifractal spectrum

2 实验结果

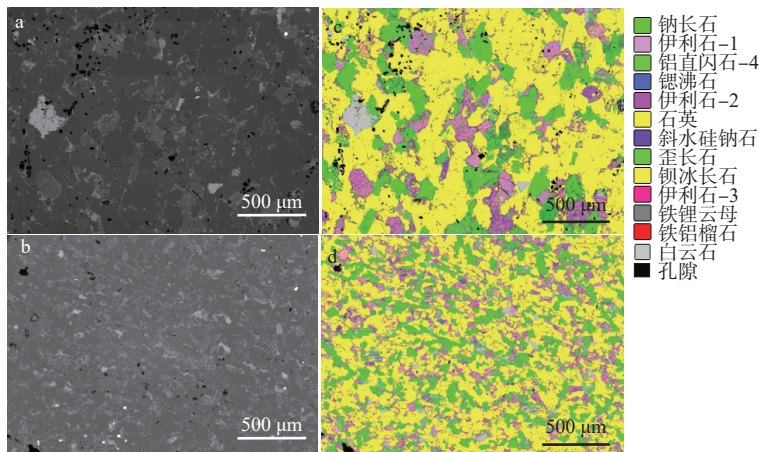
2.1 致密砂岩的微观组构特征

利用 FE-SEM 和 ANICS 获得了致密砂岩样品

(QXY 组样品 1-1、1-2)的微观结构特征和矿物组成(图 3,表 1)。砂岩样品的主要成分为石英(28.08%~52.88%),其次为长石(15.19%~34.93%)、黏土(11.54%~25.45%)。其中黏土主要分布在石英和长石颗粒之间的孔隙中。AMICS 分析的平均矿物粒度(等效圆直径)介于 61.18~184.55 μm (表 1),样品粒度差异较大(图 3)。高分辨率 CT 扫描,显示样品的孔隙度介于 8.125%~10.296% 之间(表 2)。

2.2 力学性质

QXY 组样品(1-1、1-2、1-3)单轴压缩动态演化实验结果如图 4 所示,应力-轴向位移曲线显示样品的破裂为脆性破裂。在加载的过程中应力-轴向位移曲线多处出现压力突然下降的现象,整体表现为锯齿形状。3 条曲线锯齿变形的频率和幅度存在明显的差异,说明在相同的实验条件下,破裂过程也不同。为了对比 2 组样品力学性质,选出 QDY 组一块典型样品 2-2,与 QXY 组样品的应力-轴向位移曲



a—样品 1-1 背散射图像;b—样品 1-2 背散射图像;c—样品 1-1AMICS 矿物分析图;d—样品 1-2AMICS 矿物分析图

图 3 砂岩样品的扫描电镜图像和矿物分析(2 个样品的粒度有显著的差异)

Fig. 3 Backscattering image and mineral analysis diagram of sandstone sample.

(a) Sample 1-1 backscatter image; (b) Sample 1-2 backscatter images; (c) Sample 1-1AMICS mineral analysis diagram; (d) Sample 1-2AMICS mineral analysis diagram (there is a significant difference in particle size between the two samples)

表 1 致密砂岩试样矿物含量及粒度特征

Table 1 Mineral content and particle size characteristics of tight sandstone samples

样品组	样品编号	石英/%	长石/%	黏土/%	其他/%	粒度平均值/ μm
QXY	1-1	52.88	15.19	11.54	20.39	184.55
	1-2	28.08	6.65	22.38	32.89	61.18
	1-3	45.37	15.05	14.90	20.68	71.42
QDY	2-1	39.99	21.09	25.45	13.47	65.12
	2-2	36.90	34.93	18.15	10.02	130.59
	2-3	37.77	28.12	14.85	19.26	79.08
	2-4	46.18	26.61	24.98	2.23	110.23

表 2 致密砂岩的裂缝网络体积和孔隙度

Table 2 Volume and porosity of 3D fracture network			
样品组	样品编号	孔隙度/%	孔隙体积/‰
QXY	1-1	10.296	3.54E+09
	1-2	8.516	3.26E+09
	1-3	8.917	3.43E+09
QDY	2-1	8.125	1.96E+12
	2-2	8.288	1.84E+12
	2-3	8.654	1.97E+12
	2-4	8.123	1.68E+12

线进行对比,可以看出,在宏观破裂前曲线整体比较平滑,与QXY组差异明显。

QXY组致密砂岩样品的单轴抗压强度介于69.09~188.33 MPa之间,弹性模量介于31.69~92.76 GPa之间;QDY组致密砂岩样品的单轴抗压强度分别为110.77 MPa、80.97 MPa。在岩石强度理论中,通常认为尺寸越大的岩石其内部的微裂隙、微缺陷越多,因此其破坏强度越小(Griffith, 1924; Weibull,

1939; 杨圣奇等, 2005; 王连山等, 2017; 伍法权等, 2021)。岩石强度随着尺寸的增大而减小,是一种被普遍认可的观点。实验数据分析显示除了样品1-1, QXY组其他样品的单轴抗压强度都要大于QDY组样品(表3, 图4), 样品1-1抗压强度明显偏小,不符合一般规律,这可能是由于其自身的内部微观组构特征所导致。砂岩的抗压强度和弹性模量都随着围压的增加而增加,弹性模量的增加会抑制新裂缝的扩展和形成,后面的研究也表明围压对裂缝网络的形成产生了重要的影响(表3)。

2.3 裂缝网络发育特征

2.3.1 裂缝网络演化规律

QXY组样品的砂岩裂缝网络动态演化实验显示,随着轴向压力的增加裂缝网络的面积和孔隙体积都是不断增加的,其复杂性也在逐渐增加(图5)。在动态演化实验过程中,对每个样品进行了5次CT扫描,并提取了5个裂缝网络,用不同颜色表示不同的扫描期次(图5)。3块样品动态演化过程中裂缝网络分析显示,不同样品在破裂过程中,裂缝的演化规律不同,形成的裂缝网络的复杂程度也不相同(图6)。其中样品1-1宏观破裂前,裂缝网络在不同压力下都比较发育,裂缝网络的复杂性依次为

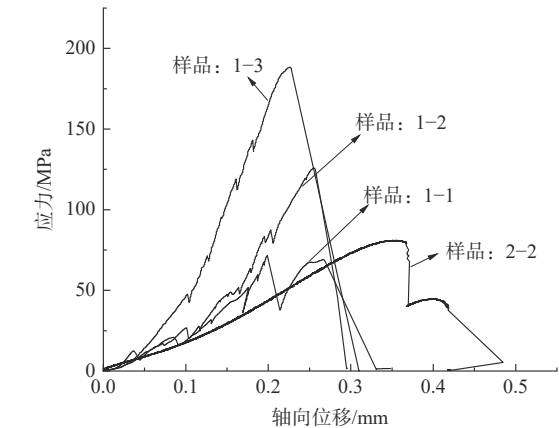


图 4 致密砂岩单轴压缩应力与轴向位移曲线

Fig. 4 Uniaxial compression stress and axial displacement curve of sandstone

表 3 致密砂岩试样基本物理力学参数

Table 3 Basic physical and mechanical parameters of tight sandstone samples							
样品组	样品编号	直径/mm	高度/mm	围压/MPa	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
QXY	1-1	4.00	8.12	0	69.09	31.69	/
	1-2	4.00	7.92	0	125.79	67.47	/
	1-3	4.00	8.06	0	188.33	92.76	/
QDY	2-1	25.00	49.97	0	110.77	22.03	0.279
	2-2	25.00	50.01	0	80.97	14.29	0.260
	2-3	25.00	50.11	15	187.95	25.81	0.259
	2-4	25.00	50.07	30	234.27	27.98	0.288

样品 1-2、1-3；宏观破裂后，其复杂性依次为样品 1-1、1-3、1-2。说明在相同的实验条件下，裂缝网络的演化规律和复杂程度还受到其他因素的影响，如矿

物成分、粒度、力学特征等 (Renard et al., 2019; Zhang et al., 2020)。

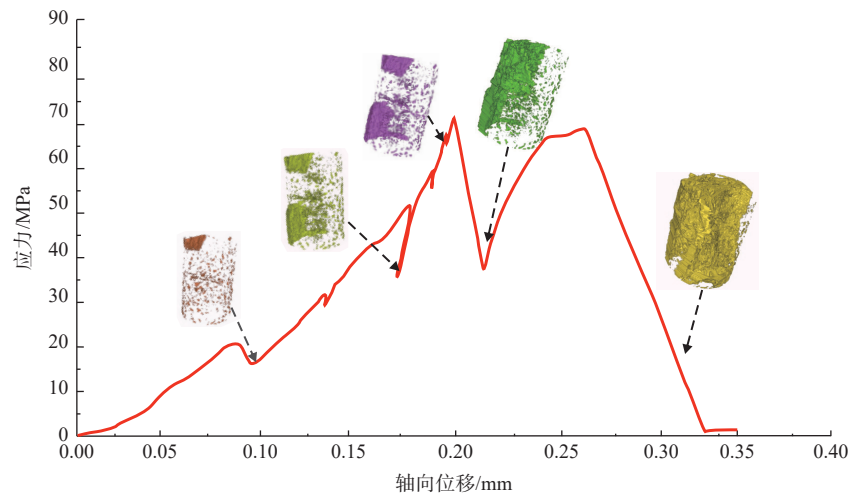


图 5 1-1 样品的应力-轴向位移曲线和不同载荷下的三维裂缝网络（不同颜色代表不同的 CT 扫描次数）

Fig. 5 Stress-axial displacement curves of 1-1 samples and three-dimensional fracture networks under different loads (colors represent different CT scans)

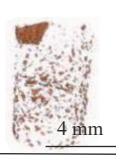
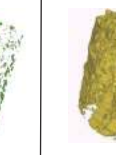
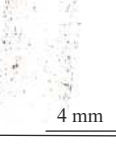
CT扫描次数 样品编号	1	2	3	4	5
1-1	 4 mm				
1-2	 4 mm				
1-3	 4 mm				

图 6 QXY 组样品不同载荷下的三维裂缝网络（CT 扫描后经过数据处理得到三维裂缝网络，用颜色区分不同的扫描次数。次数 1—4 为破裂前扫描，次数 5 为破裂后扫描）

Fig. 6 Three-dimensional crack network of QXY group samples under different loads(3D fracture network is obtained through data processing after CT scan, and the colors represent different scan times. digits 1-4 were scanned before rupture and digits 5 is scanned after rupture).

一般将岩石变形破坏过程分为压实阶段、线弹性行为阶段、非线性变形阶段和残余变形阶段等 4 个阶段 (Zhang et al., 2020)。在岩石压实阶段微孔隙或微裂缝被压实；线弹性阶段微裂缝关闭不再缩小，外部压力的增加不足以产生新的裂缝；非线性变形阶段产生了新裂缝；残余变形阶段裂缝急剧增

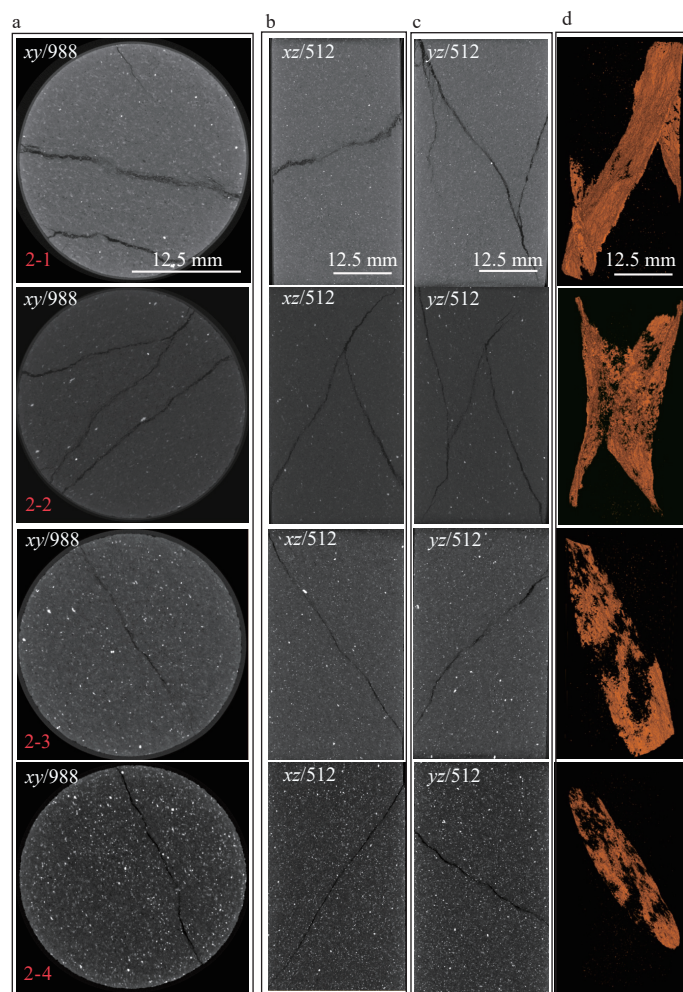
加形成宏观破裂。然而从实验结果看，在不同的变形阶段，并不是所有原始微裂缝都发生了闭合，与压力方向平行或夹角较小的原始微裂缝，会伴随着压力的增加发生开启和扩展。因此，岩石变形破裂过程是一个非常复杂的过程，是外部作用和内部微观组构共同作用的结果，在不同的变形阶段都可能

伴有新裂缝的形成。

2.3.2 裂缝网络差异性对比分析

QDY 组样品的微裂缝发育少,主要发育宏观剪切裂缝(图 7),与 QXY 组样品相比(图 6),裂缝网络的复杂性相对简单。其中样品 2-1、2-2 进行了单轴压缩,形成的裂缝网络差异较大,样品 2-1 发育 1 条贯穿剪切裂缝,2 条次生裂缝;样品 2-2 发育 2 条贯

穿剪切裂缝,1 条次生裂缝。2 组样品同为单轴压缩实验,但最终的裂缝网络的复杂性存在明显的差异,尺度较小的 QXY 组样品裂缝网络更为复杂,而 QDY 组样品与之相反。表明裂缝网络的发育存在明显的尺度效应,样品的尺度越小形成的裂缝网络越复杂。



a—xy 方向的 CT 切片; b—xz 方向的 CT 切片; c—yz 方向的 CT 切片; d—三维裂缝网络

图 7 QDY 组砂岩样品破裂后的二维 CT 切片和三维裂缝网络(图中 x 、 y 、 z 为坐标, 数字代表切片位置)

Fig. 7 Two-dimensional CT slices and three-dimensional fracture network of sandstone samples of QDY formation after fracture

(a) xy direction CT section; (b) xz direction CT section; (c) yz direction CT section; (d) 3D crack network (x , y and z are coordinates, and the numbers represent slice positions)

样品 2-3、2-4 的三轴压缩实验的围压分别为 15 MPa、30 MPa, 裂缝网络发育更为简单, 都形成了 1 条宏观剪切裂缝, 且倾角随围压增大而减小。对大量二维切片的观察发现, QDY 组样品以发育宏观裂缝为主, 次生微裂缝发育很少。说明裂缝网络的形成存在明显的围压效应, 随着围压的增加裂缝网

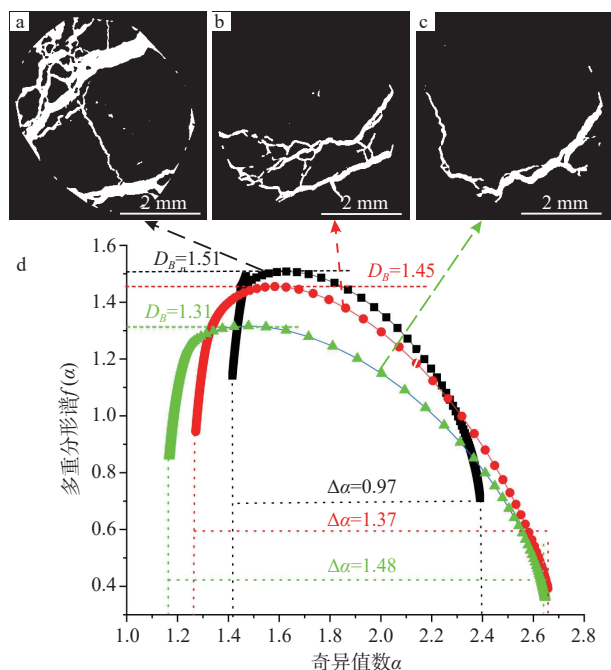
络的复杂性会降低。

2.4 裂缝网络的分形特征

2.4.1 多重分形特征

通过计算二维裂缝网络的多重分形谱, 得到裂缝网络的最大分形维数和谱宽(图 8)。可以看出, 裂缝网络空间分布存在明显的差异, 3 个裂缝网络

的空间复杂性依次减弱,分布均匀程度越小,而对应的最大分形维数逐渐减小,而谱宽逐渐增大。



D_B —分形维数; $\Delta\alpha$ —多重分形谱宽度

a—最大分形维数为 1.51 的二维裂缝网络; b—最大分形维数为 1.45 的二维裂缝网络; c—最大分形维数为 1.31 的二维裂缝网络; d—多重分形谱

图 8 砂岩样品的二维裂缝网络对应的多重分形谱
Fig. 8 Two-dimensional fracture network and corresponding multifractal spectrum of sandstone samples.

(a) Two-dimensional fracture network with a maximum fractal dimension of 1.51; (b) Two-dimensional fracture network with a maximum fractal dimension of 1.45; (c) Two-dimensional fracture network with a maximum fractal dimension of 1.31; (d) Multifractal spectrum

多重分形谱的谱宽和最大分形维数之间的关系一直是学者们的重点研究内容。由 4 个样品的谱宽、最大分形维数之间的关系(图 9),可以看出,谱宽和最大分形维数呈离散分布,裂缝网络在空间上非均质性和复杂性存在明显的差异。从对裂缝网络的直观观察、数据分析发现,对于 QXY 组样品,二者呈无相关或微弱正相关;对于 QDY 组样品,二者之间呈现正相关性或弱正相关性。Zhu(2022b)对二维离散裂缝网络分析表明,分形维数有微弱的有限尺寸效应,而谱宽没有有限尺寸效应,分形维数和谱宽二者几乎是独立的,它们分别量化了裂缝网络复杂性的不同方面。而 QDY 组样品二者之间呈现正相关性或弱正相关性,可能是该组样品的裂缝网络过于简单的原因。

2.4.2 三维裂缝网络分形维数

三维裂缝网络分形维数维数计介于 1.28~2.35 之间(表 4)。目前还没有可靠的方法计算三维裂缝网络多重分形谱,文章通过计算二维裂缝网络多重分形谱的谱宽,得到谱宽的平均值,用于表征三维裂缝网络的空间非均质性,谱宽平均值介于 1.0851~1.3638 之间。

分形维数的大小反映了裂缝网络的复杂性,分形维数越大裂缝网络的越复杂;谱宽平均值反映出裂缝网络空间分布的非均质性,数值越大越不均匀。说明通过三维裂缝网络分形维数和谱宽的平均值可以分别量化表征裂缝空间分布的复杂性和非均质性。

3 讨论

3.1 岩石微观组构对裂缝网络的影响

3.1.1 矿物组分

砂岩是由碎屑颗粒、胶结物及孔隙 3 部分组成的非均质体,其变形破裂过程受到矿物成分、矿物粒径分布、孔隙度等内部因素的影响(熊良锋等, 2022; Wang et al., 2023)。裂缝网络的三维分形维数与石英含量之间存在正相关性,而与黏土含量呈负相关性(图 10a)。这是因为实验样品的矿物主要为石英、长石、黏土矿物(包括伊利石、云母等)。不同矿物在裂缝扩展中起的作用不同,黏土矿物强度较低,抗拉、抗剪强度远小于碎屑颗粒强度值,在外力作用下,黏土矿物最先破坏失效,容易形成张性微裂缝,且裂缝分布均匀,但黏土矿物不利于应力集中和传导,导致裂缝很难合并成核和贯通;而石英、长石等脆性矿物往往较坚硬、抗压强度高,可以承受较大的压力,但有利于应力的集中,能加速应力的传递,容易导致裂缝的合并成核和贯通。进一步说明石英含量高的砂岩样品,更有利于裂缝的扩展和复杂裂缝网络的形成,而黏土矿物高不利于复杂裂缝网络的形成。

在不考虑围压的条件下,谱宽平均值与石英的百分含量之间呈负相关性,而与黏土含量呈正相关(图 10b)。表明石英含量越高的样品,裂缝的空间分布越不均匀,裂缝的非均质性越强,相反黏土含量越高,裂缝分布更均匀,非均质性越弱。

3.1.2 孔隙度

依据格里菲斯(Griffith, 1920)断裂力学理论,岩

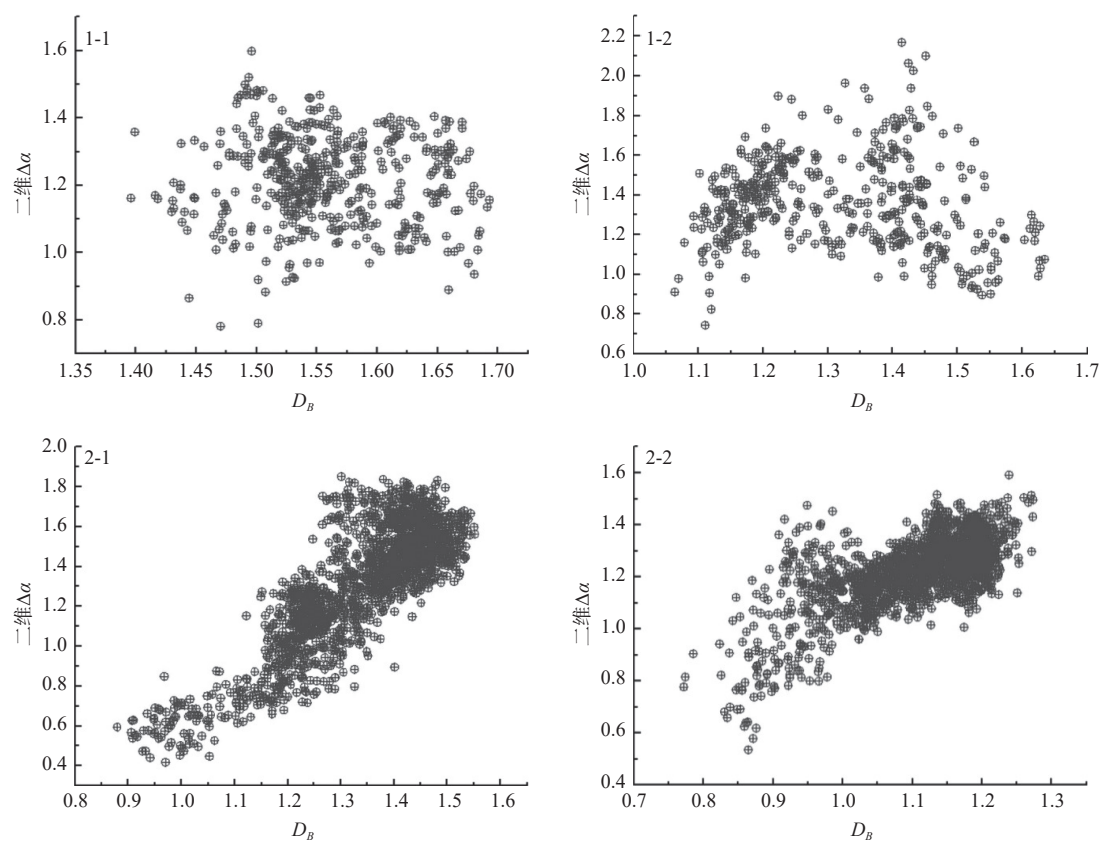


图 9 二维裂缝网络多重分形谱的最大分形维数与谱宽之间的关系（图中数字为样品编号）

Fig. 9 Relationship between the maximum fractal dimension and the spectral width of the multifractal spectrum of a two-dimensional fracture network (the number in the figure is the sample number)

表 4 裂缝网络分形特征参数

Table 4 Fractal characteristic parameters of fracture network

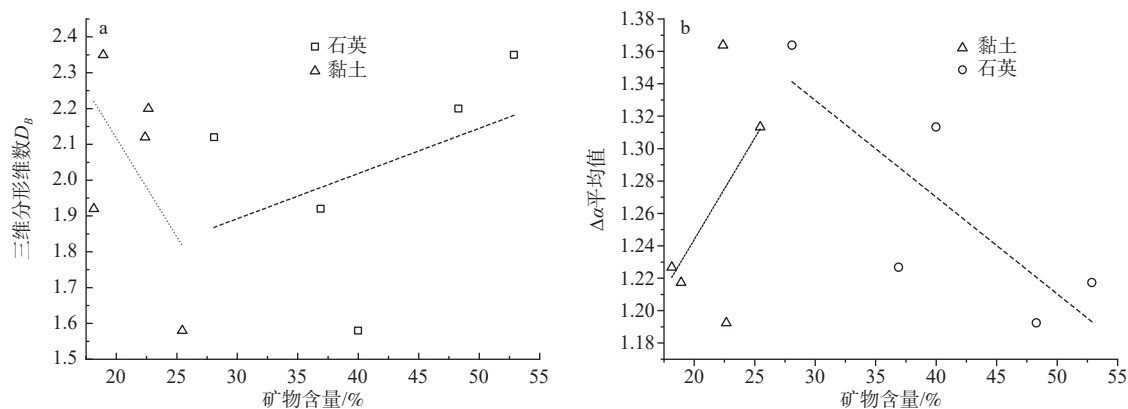
样品组	样品编号	二维 $\Delta\alpha$ 平均值	三维分形维数 D_B
QXY	1-1	1.2173	2.35
	1-2	1.3638	2.12
	1-3	1.1924	2.20
QDY	2-1	1.3133	1.59
	2-2	1.2267	1.92
	2-3	1.0066	1.48
	2-4	1.0851	1.28

石的破裂源自于其内部的微裂隙,宏观破裂是由其内部的微裂隙和孔隙扩展演化而成,因此,孔隙的发育程度会直接影响裂缝网络的形成。DXY 组样品尺度和加载条件相同,分析结果显示三维裂缝网络的分形维数与孔隙度之间有良好的正相关性,与谱宽平均值之间存在弱负相关性(图 11)。表明孔隙度越大裂缝网络的复杂、空间分布越均匀。从表 2、表 4 也可以看出,QDY 组样品 2-1、2-2,在不考

虑围压的情况下,也具有同样的趋势。

3.1.3 砂岩粒度

粒度大小是砂岩最重要的结构特征之一,对砂岩的力学性质、变形破裂等具有重要的影响(Eberhardt et al., 1999; 郭宇航, 2018; 周婧和沈振振, 2021)。AMICS 矿物分析显示 7 个样品的平均粒径(等效圆直径)介于 60~185 μm 之间,差异较大(表 2)。2 个样品的粒度分布曲线见图 12,其中



a—三维分形维数与矿物含量; b—谱宽平均值与矿物含量

图 10 矿物含量与三维分形维数 (D_B)、谱宽 ($\Delta\alpha$) 平均值之间的关系 (单轴压缩样品的数据)

Fig. 10 Relationship between mineral content and three-dimensional fractal dimension as well as mean spectral width (uniaxial compression sample data)

(a) Three-dimensional fractal dimension and mineral content; (b) Average spectral width and mineral content;

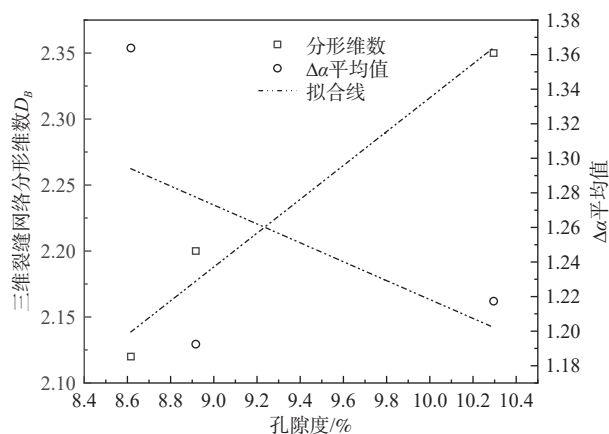


图 11 QXY 组砂岩孔隙度与谱宽平均值和三维裂缝网络分形维数之间的关系

Fig. 11 Relationship between the porosity of QXY formation sandstone and the mean value of and the fractal dimension of three-dimensional fracture network

P20、P50、P80 分别表示样品的累计粒度 (或累计通过率) 分布百分数达到 20%、50%、80% 时所对应的粒径, 可以看出小于 P50 的颗粒也占 50%。

无围压的条件下, 砂岩的粒度与三维裂缝网络分形维数之间存在很好的正相关性 (图 13a), 与谱宽平均值之间呈现负相关性关系 (图 13b)。砂岩粒径越大三维裂缝网络越复杂, 裂缝空间分布越均匀, 即非均质性越强。以前的研究表明岩石的粒度越小强度越高, 有利于拉张性微裂缝的形成; 而粒度大的颗粒, 形状不规则表面粗糙, 强度较弱, 容易导致颗粒破裂, 多产生剪切微裂缝。单轴压缩的实验样品, 粒度较小的砂岩具有更高的抗压强度和弹

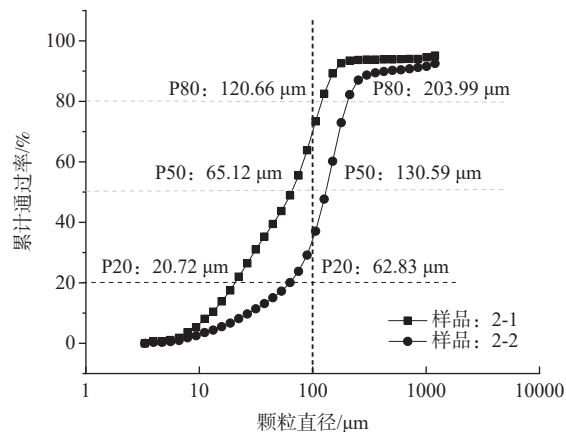


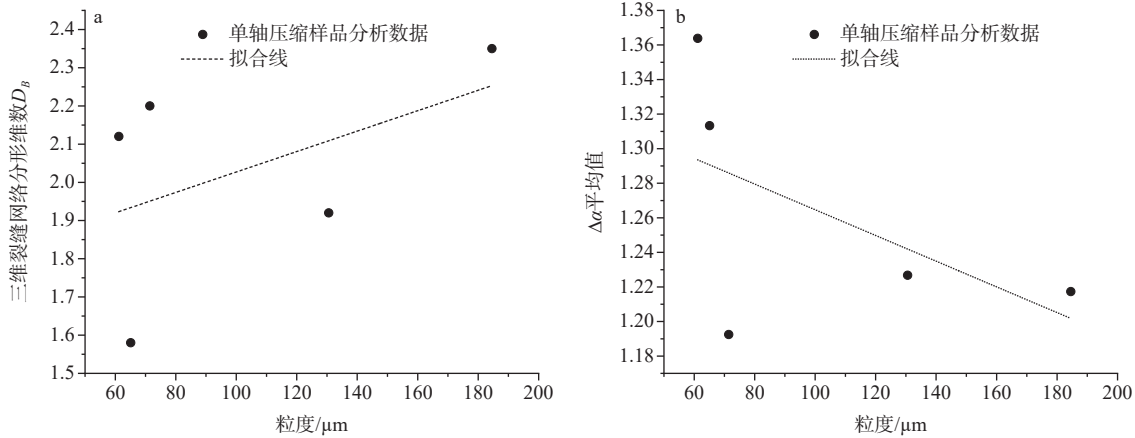
图 12 砂岩试样颗粒粒度分布图

Fig. 12 Grain size distribution of sandstone samples

性模量, 破坏后表现出较大的破碎程度, 裂缝网络更为复杂, 而粒径较大的砂岩裂缝网络相对简单。对比表 1 和表 2, 样品的抗压强度和弹性模量符合上述规律; 但图 13a 显示, 粒度与分形维数成正相关性, 是因为岩石极为复杂, 而影响裂缝网络复杂的因素众多, 除了上述影响因素以外, 如样品的胶结程度、孔隙非均质性、各向异性、尺度等都会影响其复杂性, 在样品较少的情况下, 统计规律不可避免的会产生偏差。

3.2 力学性质对裂缝网络的影响

QXY 组样品在动态演化过程显示, 分形维数随着载荷的增加而增加 (图 14)。表明随着载荷的增加, 原始微裂隙不断扩展, 新生裂缝不断增加, 裂缝网络的变得越来越复杂。对比 3 个样品裂缝网络的演化过程, 演化规律存在明显的差异, 其中样品 1-



a—三维裂缝网络分形维数与粒度；b—谱宽平均值与粒度

图 13 砂岩平均粒径与三维裂缝网络分形维数 (D_B)、谱宽 ($\Delta\alpha$) 平均值之间的关系 (单轴压缩样品的数据)
Fig. 13 Relation ships between average particle size of sandstone and fractal dimension as well as average spectral width of three-dimensional fracture network (data of uniaxial compression sample)

(a) Fractal dimension of three-dimensional fracture network and particle size; (b) Average spectral width and particle size

1、1-3 的分形维数, 随着应力的增加一开始增加缓慢, 然后急剧增加, 而样品 1-2 的分形维数增加较为均匀。在相同的实验条件下, 这种差异来自于样品的内部微观组构的不同, 样品 1-2 黏土含量最高孔隙度低(表 1, 表 2), 导致拉张性裂缝不断发育, 分布均匀。进一步说明裂缝网络的复杂性受到自身的微观组构的影响。

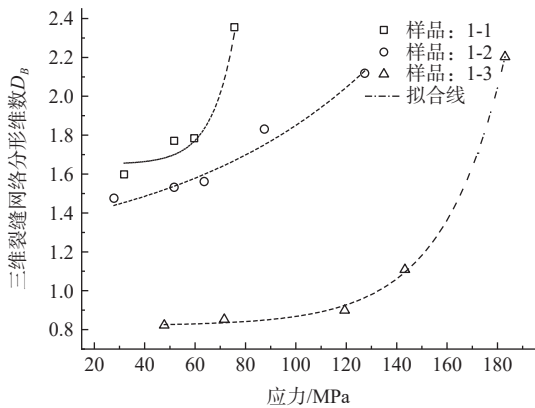


图 14 砂岩三维裂缝网络的分形维数随应力的增加的变化趋势

Fig. 14 Effect of stress level on fractal dimension of sandstone 3D fracture network changes with the increase of stress

随着围压的增加, 岩石的抗压强度、轴向应变、泊松比均逐渐增大, 围压加强了岩石的承载能力和抗变形能力、增强了岩石的韧性(张浩等, 2007; 丁长栋等, 2019; 马尚伟等, 2022; 李斌等, 2023)。对于 QDY 组样品, 在低围压时, 岩石的微裂缝发育较多, 且主裂缝方向与轴向夹角较小, 且贯

穿整个岩石, 样品的破碎程度高, 裂缝网络比较复杂; 高围压时, 微裂缝发育减少, 主裂缝较规整, 且主裂缝与轴向夹角较大, 岩石破裂后的裂缝网络比较简单。从定量化分析显示, 三维裂缝网络分形维数与围压之间呈明显的负相关性, 而与谱宽平均值呈正相关(图 15)。

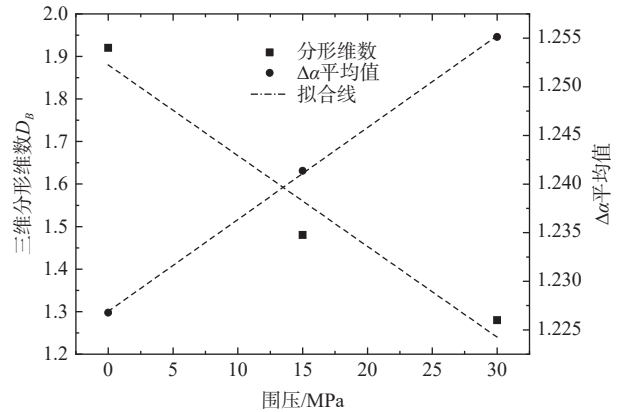


图 15 围压与分形维数和谱宽平均值之间的关系

Fig. 15 Relationship between confining pressure and fractal dimension and mean spectral width

岩石抗压强度和弹性模量表征了岩石的抗变形能力, 围压越大抗变形能力越强, 越不利于裂缝的形成。单轴压缩条件下, 2 组样品破裂后的三维裂缝网络的分形维数与抗压强度、弹性模量呈现弱正相关性, 而谱宽平均值与之呈现弱负相关性(表 3, 表 4)。表明裂缝网络的复杂性与抗压强度、弹性模量的力学参数存在一定的关系。

4 结论

(1)分形维数和谱宽平均值分别反映了裂缝网络空间分布的2个方面,是2个独立的参数。分形维数可以表征裂缝网络的复杂性,分形维数越大裂缝网络越复杂;谱宽可以表征裂缝网络空间分布的非均质性,谱宽越小空间分布越均匀。

(2)裂缝网络的复杂性受控于其自身微观组构特征和尺寸大小。从砂岩微观组构上看,石英含量越高、孔隙度越大、粒度越小裂缝网络空间分布越复杂,非均质性越强,黏土矿物不利于复杂裂缝的形成;裂缝网络的复杂性具有明显的尺度效应,尺度越小裂缝网络的空间分布越复杂,非均质性越弱。

(3)裂缝网络的复杂性与围压、样品的力学性质密切相关。在单轴压缩的条件下,样品裂缝网络的复杂性主要受控于微观组构特征,且随着轴向压力的增加越复杂;存在围压的情况下,围压起主导作用,围压越大裂缝空间分布越简单,空间分布越不均匀。

References

- BARTON C C, 1995. Fractal analysis of scaling and spatial clustering of fractures[M]. In: *Fractals in the Earth Sciences*. Springer, 141-178.
- BERKOWITZ B., HADAD A, 1997. Fractal and multifractal measures of natural and synthetic fracture networks[J]. *Journal Of Geophysical Research-solid Earth* 102: 12205-12218
- BIENIAWSKI Z T, 1967. Mechanism of brittle fracture of rock: Part II-experimental studies[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 4(4): 407-423.
- CAI M, KAISER P K, TASAKA Y, et al., 2004. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(5): 833-847.
- CAI M, MORIOKA H, KAISER P K, et al., 2007. Back-analysis of rock mass strength parameters using AE monitoring data[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(4): 538-549.
- CHEN X, MA L T, SHI C L, et al., 2022. Water occurrence and identification method of the water-bearing degree of tight sandstone reservoirs in the Linxing block[J]. *Geology and Exploration*, 58(6): 1331-1340. (in Chinese with English abstract)
- DERSHOWITZ W S, HERDA H H, et al., 1992. Interpretation of fracture spacing and intensity[C]. In: *The 33th Us Symposium on Rock Mechanics*. USRMS, American Rock. Mechanics Association.
- DING C D, ZHANG Y, YANG X T, et al., 2019. Permeability evolution of tight sandstone under high confining pressure and high pore pressure and its microscopic mechanism[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 40(9): 3300-3308. (in Chinese with English abstract)
- DUAN M K, JIANG C B, GAN Q, et al., 2020. Experimental investigation on the permeability, acoustic emission and energy dissipation of coal under tiered cyclic unloading[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 73: 103054.
- DUNCAN P M, EISNER L, 2010. Reservoir characterization using surface microseismic monitoring[J]. *Geophysics*, 75(5): 75A139-75A146.
- EBERHARDT E, STIMPSON B, STEAD D, 1999. Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 32(2): 81-99.
- FAN J M, CHEN X D, LEI Z D, et al., 2019. Characteristics of natural and hydraulic fractures in tight oil reservoir in Ordos Basin and its implication to field development[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 43(3): 98-106. (in Chinese with English abstract)
- GAO C Y, ZHAO F H, GAO L F, et al., 2023. The methods of fracture prediction based on structural strain analysis and its application[J]. *Journal of Geomechanics*, 29(1): 21-33. (in Chinese with English abstract)
- GHASEMI S, KHAMEHCHIYAN M, TAHERI A, et al., 2020. Crack evolution in damage stress thresholds in different minerals of granite rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(3): 1163-1178.
- GRIFFITH A A, 1924. The theory of rupture[C]. In: *Proceedings of the First International Congress for Applied Mechanics*, 55-63.
- GRIFFITH A. A., 1920. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids[J]. *Phil Trans Roy Soc(London)*, A221: 162-198.
- GUO Y H, 2018. Experimental study on the effect of particle size on the mechanical properties of sandstone[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology. (in Chinese with English abstract)
- HOU B, ZHANG R X, ZENG Y J, et al., 2018. Analysis of hydraulic fracture initiation and propagation in deep shale formation with high horizontal stress difference[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 170: 231-243.
- JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al., 2007. Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. *AAPG Bulletin*, 91(4): 475-499.
- LI B, LI J L, WANG P, et al., 2023. Confining pressure effect and quantitative characterization of rock shear strength parameters[J]. *China Mining Magazine*, 32(2): 157-164. (in Chinese with English abstract)
- LI M, GUO Y H, WANG H C, et al., 2020. Effects of mineral composition on the fracture propagation of tight sandstones in the Zizhou area, east Ordos Basin, China[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 78: 103334.
- LI S Y, HE T M, YIN X C, 2010. Introduction of rock fracture mechanics [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press. (in Chinese)
- LI Y W, YANG S, ZHAO W C, et al., 2018. Experimental of hydraulic fracture propagation using fixed-point multistage fracturing in a vertical well in tight sandstone reservoir[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171: 704-713.

- LING J M, 1993. Study on the mesoscopical characteristics of rock damage under compressive loading[J]. *Journal of Tongji University*, 21(2): 219-226. (in Chinese with English abstract)
- LIU F Y, YANG T H, ZHANG P H, et al., 2018. Dynamic inversion of rock fracturing stress field based on acoustic emission[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 39(4): 1517-1524. (in Chinese with English abstract)
- LIU J S, DING W L, XIAO Z K, et al., 2019. Advances in comprehensive characterization and prediction of reservoir fractures[J]. *Progress in Geophysics*, 34(6): 2283-2300. (in Chinese with English abstract)
- LIU S X, WANG Z X, ZHANG L Y, 2018. Experimental study on the cracking process of layered shale using X-ray microCT[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 36(2): 297-313.
- LIU S X, WANG Z X, ZHANG L Y, et al., 2018. Micromechanics properties analysis of shale based on nano-indentation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 33(6): 957-968. (in Chinese with English abstract)
- LIU S X, WANG Z X, ZHANG L Y, et al., 2019. Effects of microstructure characteristics of shale on development of complex fracture network[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 36(2): 420-428. (in Chinese with English abstract)
- MA S W, WEI L, WANG Y J, et al., 2022. Characterization and evaluation of microscopic pore structures of tight sandstone reservoir in the 8th member of Shihezi Formation in southern Ordos Basin[J]. *Geology and Exploration*, 58(6): 1321-1330. (in Chinese with English abstract)
- MANDELBROT B B, 1982. *The Fractal Geometry of Nature*, vol. 1. WH freeman, New York. Matsumoto, N., Yomogida, K., Honda, S., 1992. Fractal analysis of fault systems in Japan and the Philippines[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 19: 357-360.
- MIAO S Y, ZHANG H J, CHEN Y K, et al., 2019. Surface microseismic monitoring of shale gas hydraulic fracturing based on microseismic location and tomography[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 58(2): 262-271, 284. (in Chinese with English abstract)
- NASSERI M H, RAO K S, RAMAMURTHY T, 1997. Failure mechanism in schistose rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4): 219. e1-219. e15.
- PAN L Y, HAO L H, LIU K X, et al., 2023. Fracture Propagation Law of Hydraulic Fracturing in High-Salinity Reservoir of Fengcheng Formation in Mahu[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 19(4): 20-28
- PESTMAN B J, VAN MUNSTER J G, 1996. An acoustic emission study of damage development and stress-memory effects in sandstone[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 33(6): 585-593.
- RENARD F, MCBECK J, CORDONNIER B, et al., 2019. Dynamic in situ three-dimensional imaging and digital volume correlation analysis to quantify strain localization and fracture coalescence in sandstone[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 176(3): 1083-1115.
- SHANG C J, KANG Y S, DENG Z, et al., 2019. The influence mechanism of filled natural fractures on the variation law of shale permeability in loading process[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(3): 382-391. (in Chinese with English abstract)
- SHI X, PAN J, HOU Q, et al., 2018. Micrometer-scale fractures in coal related to coal rank based on micro-ct scanning and fractal theory[J]. *Fuel*, 212: 162-172.
- TAN Y L, WANG Z X, FENG X Q, et al., 2021. Structural preservation conditions analysis of oil and gas in complex structural area: A case study of structural analysis in the Well Wanjingdi-1, Anhui, China[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(3): 441-452. (in Chinese with English abstract)
- THIELE S T, GROSE L, SAMSU A, MICKLETHWAITE S, et al., 2017. Rapid, semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data[J]. *Solid Earth* 8: 1241-1253.
- WANG D K, ZENG F C, WEI J P, et al., 2021. Quantitative analysis of fracture dynamic evolution in coal subjected to uniaxial and triaxial compression loads based on industrial CT and fractal theory[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196: 108051.
- WANG L S, SUN D S, ZHENG X H, et al., 2017. Size effect experiment of uniaxial compressive strength of three typical rocks[J]. *Journal of Geomechanics*, 23(2): 327-333. (in Chinese with English abstract)
- WANG S, XU Y, ZHANG Y B, et al., 2023. Effects of sandstone mineral composition heterogeneity on crack initiation and propagation through a microscopic analysis technique[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 162: 105307.
- WANG Y, WANG H M, ZHU H B, 2021. Preliminary study on physical experimental simulation of hydraulic fracturing[J]. *Progress in Geophysics*, 36(3): 1130-1137. (in Chinese with English abstract)
- WEIBULL W, 1939. *A statistical theory of the strength of materials*[M]. Stockholm: Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag: 1-29.
- WEN X L, KONG M W, LUO Y, et al., 2021. Study and Application of Fracturing Technology for Tight Reservoir With HPHT Closure Stress in the Southern Margin of Junggar Basin[J]. *Xinjiang oil & Gas*, 17(4): 15-20.
- WEN S S, YIN C, SHI X W, et al., 2023. Multi-scale rupture characteristics dominated by pre-existing fractures of Longmaxi shale during hydraulic fracturing in Luzhou block[J]. *Progress in Geophysics*, 38(5): 2172-2181. (in Chinese with English abstract)
- WU F Q, QIAO L, GUAN S G, et al., 2021. Uniaxial compression test study on size effect of small size rock samples[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(5): 865-873. (in Chinese with English abstract)
- WU H, ZHOU Y, YAO Y, et al., 2019. Imaged based fractal characterization of microfracture structure in coal[J]. *Fuel*, 239: 53-62.
- WU N, SHI S, ZHENG S Q, et al., 2022. Formation pressure calculation of tight sandstone gas reservoir based on material balance inversion method[J]. *Coal Geology & Exploration*, 50(9): 115-121. (in Chinese with English abstract)
- WU S T, YANG Z, PAN S Q, et al., 2020. Three-dimensional imaging of fracture propagation in tight sandstones of the Upper Triassic Chang 7 member, Ordos Basin, Northern China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 120: 104501.
- XIE H P, CHEN Z D, 1989. Analysis of rock fracture micro-mechanism[J]. *Journal of China Coal Society*(2): 57-66. (in Chinese with English abstract)
- XING H T, ZHANG X L, HE J X, et al., 2022. Mineral composition charac-

- teristics and petroleum geological significance of tight sandstone of Longtan Formation in Weixin area, eastern Yunnan[J]. *Coal Geology & Exploration*, 50(4): 52-60. (in Chinese with English abstract)
- XIONG L F, 2021. Mechanisms and factors of the localized deformation in porous rocks[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing. (in Chinese with English abstract)
- XIONG L F, 2022. Study on deformation and failure mechanism of porous rock and its influencing factors [D]. Beijing University of Science and Technology.
- YANG F, MEI W B, LI L, et al., 2023. Propagation of hydraulic fractures in thin interbedded tight sandstones[J]. *Coal Geology & Exploration*, 51(7): 61-71. (in Chinese with English abstract)
- YANG S Q, SU C D, XU W Y, 2005. Experimental and theoretical study of size effect of rock material[J]. *Engineering Mechanics*, 22(4): 112-118. (in Chinese with English abstract)
- YU X, LI G, CHEN Z, et al., 2021. Experimental study on physical and mechanical characteristics of tight sandstones in the Xujiahe Formation in western Sichuan after high-temperature exposure[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- ZENG L B, LYU W Y, LI J, et al., 2016. Natural fractures and their influence on shale gas enrichment in Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 30: 1-9.
- ZHANG D M, WANG P, ZANG D G, et al., 2023. Pre-stack reservoir prediction of tight sandstone of the fifth member of Xujiahe Formation in the Wubaochang area of northeastern Sichuan[J]. *Geology and Exploration*, 59(6): 1356-1365. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H, KANG Y L, CHEN J S, et al., 2007. Experimental study on mechanical properties of dense sandstone under different confining pressures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(S2): 4227-4231. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y F, NIU S Y, DU Z M, et al., 2020. Dynamic fracture evolution of tight sandstone under uniaxial compression in high resolution 3D X-ray microscopy[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195: 107585.
- ZHAO C, LIU F M, TIAN J Y, et al., 2016. Study on single crack propagation and damage evolution mechanism of rock-like materials under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(S2): 3626-3632. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO N, WANG L, ZHANG L, et al., 2022. Mechanical properties and fracturing characteristics of tight sandstones based on granularity classification: a case study of Permian Lower Shihezi Formation, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 44(4): 720-729, 738. (in Chinese with English abstract)
- ZHONG J H, LIU S X, MA Y S, et al., 2015. Macro-fracture mode and micro-fracture mechanism of shale[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 42(2): 242-250. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU J, SHEN Z Z, 2021. The effect of grain size on the mechanical properties of sandstone[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 41(18): 81-82. (in Chinese with English abstract)
- ZHU H Y, SONG Y J, LEI Z D, et al., 2022a. 4D-stress evolution of tight sandstone reservoir during horizontal wells injection and production: A case study of Yuan 284 block, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 49(1): 156-169.
- ZHU W W, HE X P, LI Y T, et al., 2022b. Impacts of fracture properties on the formation and development of stimulated reservoir volume: a global sensitivity analysis[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 217: 110852.
- ZHU W W, LEI G, HE X P, et al., 2022c. Fractal and multifractal characterization of stochastic fracture networks and real outcrops[J]. *Journal of Structural Geology*, 155: 104508.
- ZHU W W, LEI G, HE X P, et al., 2022d. Can we infer the percolation status of 3D fractured media from 2D outcrops?[J]. *Engineering Geology*, 302: 106648.

附中文参考文献

- 陈鑫, 马立涛, 史长林, 等, 2022. 临兴区块致密砂岩储层水赋存状态及气层含水程度识别方法[J]. *地质与勘探*, 58(6): 1331-1340.
- 丁长栋, 张杨, 杨向同, 等, 2019. 致密砂岩高围压和高孔隙水压下渗透率演化规律及微观机制[J]. *岩土力学*, 40(9): 3300-3308.
- 樊建明, 陈小东, 雷征东, 等, 2019. 鄂尔多斯盆地致密油藏天然裂缝与人工裂缝特征及开发意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 43(3): 98-106.
- 高晨阳, 赵福海, 高莲凤, 等, 2023. 基于构造应变分析的裂缝预测方法及其应用[J]. *地质力学学报*, 29(1): 21-33.
- 郭宇航, 2018. 粒度对红砂岩力学性质的影响规律试验研究[D]. 青岛: 山东科技大学.
- 李斌, 李佳伦, 王鹏, 等, 2023. 岩石抗剪强度参数的围压效应与定量表征[J]. *中国矿业*, 32(2): 157-164.
- 李世愚, 和泰名, 尹祥础, 2010. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- 凌建明, 1993. 压缩荷载条件下岩石细观损伤特征的研究[J]. *同济大学学报*, 21(2): 219-226.
- 刘飞跃, 杨天鸿, 张鹏海, 等, 2018. 基于声发射的岩石破裂应力场动态反演[J]. *岩土力学*, 39(4): 1517-1524.
- 刘敬寿, 丁文龙, 肖子亢, 等, 2019. 储层裂缝综合表征与预测研究进展[J]. *地球物理学进展*, 34(6): 2283-2300.
- 刘圣鑫, 王宗秀, 张林炎, 等, 2019. 页岩微观组构特征对复杂裂缝网络形成的影响[J]. *采矿与安全工程学报*, 36(2): 420-428.
- 马尚伟, 魏丽, 王一军, 等, 2022. 鄂尔多斯盆地南部盒8段致密砂岩储层微观孔隙结构表征与评价[J]. *地质与勘探*, 58(6): 1321-1330.
- 缪思钰, 张海江, 陈余宽, 等, 2019. 基于微地震定位和速度成像的页岩气水力压裂地面微地震监测[J]. *石油勘探*, 58(2): 262-271, 284.
- 潘丽燕, 郝丽华, 刘凯新, 等, 2023. 玛湖风城组高含盐储层水力压裂裂缝扩展规律[J]. *新疆石油天然气*, 19(4): 20-28.
- 尚春江, 康永尚, 邓泽, 等, 2019. 充填天然裂缝对页岩受载过程中渗透率变化规律影响机理分析[J]. *地质力学学报*, 25(3): 382-391.

- 谭元隆, 王宗秀, 冯兴强, 等, 2021. 复杂构造区油气构造保存条件分析: 来自皖泾地 1 井的构造解析 [J]. *地质力学学报*, 27(3): 441-452.
- 王连山, 孙东生, 郑秀华, 等, 2017. 三种典型岩石单轴抗压强度的尺寸效应试验研究 [J]. *地质力学学报*, 23(2): 327-333.
- 王瑜, 王辉明, 朱海波, 2021. 水力压裂物理实验模拟初探 [J]. *地球物理学进展*, 36(3): 1130-1137.
- 文贤利, 孔明炜, 罗垚, 等, 2021. 准噶尔盆地南缘高温高压高闭合应力致密储层改造技术研究及应用 [J]. *新疆石油天然气*, 17(4): 15-20.
- 文山师, 尹陈, 石学文, 等, 2023. 天然裂缝主导模式下泸州龙马溪组页岩水力压裂多尺度破裂特征 [J]. *地球物理学进展*, 38(5): 2172-2181.
- 伍法权, 乔磊, 管圣功, 等, 2021. 小尺寸岩样单轴压缩试验尺寸效应研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 40(5): 865-873.
- 武男, 石石, 郑世琪, 等, 2022. 基于物质平衡反演法的致密砂岩气藏地层压力计算 [J]. *煤田地质与勘探*, 50(9): 115-121.
- 谢和平, 陈至达, 1989. 岩石断裂的微观机理分析 [J]. *煤炭学报*(2): 57-66.
- 邢慧通, 张晓丽, 何金先, 等, 2022. 滇东威信地区龙潭组致密砂岩矿物组成特征及其油气地质意义 [J]. *煤田地质与勘探*, 50(4): 52-60.
- 熊良锋, 2021. 孔隙岩石变形破坏机制及其影响因素研究 [D]. 北京: 北京科技大学.
- 熊良锋, 2022. 孔隙岩石变形破坏机制及其影响因素研究 [D]. 北京科技大学.
- 杨帆, 梅文博, 李亮, 等, 2023. 薄互层致密砂岩水力压裂裂缝扩展特征研究 [J]. *煤田地质与勘探*, 51(7): 61-71.
- 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚, 2005. 岩石材料尺寸效应的试验和理论研究 [J]. *工程力学*, 22(4): 112-118.
- 于鑫, 李皋, 陈泽, 等, 2021. 川西须家河组致密砂岩高温后的物理力学特征参数试验研究 [J]. *地质力学学报*, 27(1): 1-9.
- 张德明, 王鹏, 臧殿光, 等, 2023. 川东北五宝场地区须五段致密砂岩叠前储层预测 [J]. *地质与勘探*, 59(6): 1356-1365.
- 张浩, 康毅力, 陈景山, 等, 2007. 变围压条件下致密砂岩力学性质实验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 26(S2): 4227-4231.
- 赵程, 刘丰铭, 田加深, 等, 2016. 基于单轴压缩试验的岩石单裂纹扩展及损伤演化规律研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 35(S2): 3626-3632.
- 钟建华, 刘圣鑫, 马寅生, 等, 2015. 页岩宏观破裂模式与微观破裂机理 [J]. *石油勘探与开发*, 42(2): 242-250.
- 周婧, 沈振振, 2021. 粒度对砂岩力学性质的作用 [J]. *中国石油和化工标准与质量*, 41(18): 81-82.